



## Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale

Frédéric Paran, Roland Déchomets, Didier Graillot

### ► To cite this version:

Frédéric Paran, Roland Déchomets, Didier Graillot. Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale. *Géomatique Expert*, 2008, 64, pp.73-79. emse-00354833

**HAL Id: emse-00354833**

**<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-00354833>**

Submitted on 30 Jan 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale : Contexte de données fragmentées et hétérogènes. Application au fleuve Rhône.

**Auteurs :** Frédéric PARAN, Roland DECHOMETS, Didier GRAILLOT

**Coordonnées :** École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE)

Centre SITE (Sciences Informations et Technologies pour l'Environnement)

158, cours Fauriel

42 023 Saint-Etienne Cedex 2

E-mail : [paran@emse.fr](mailto:paran@emse.fr) ; [dechomets@emse.fr](mailto:dechomets@emse.fr) ; [graillet@emse.fr](mailto:graillet@emse.fr)

**Mots clefs :** Echanges nappes/rivière, fleuve Rhône, analyse spatiale, TIN, Loi de Darcy

**Logiciel ESRI utilisé :** ARCGIS 9.2 avec les extensions 3D Analyst et Spatial Analyst.

## Origine des données :

- Compagnie Nationale du Rhône (CNR)
- Littérature (voir références bibliographiques)

**Contexte du projet de recherche :** Action de recherche Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR)

**Financements :** Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée et Corse (AE-RMC)

## 1. Introduction

Le travail présenté dans cette communication est issu de l'action de recherche ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) / Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée et Corse débutée en juin 2006 et intitulée « Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides) - Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels » (Bornette & al., 2007, 2008). La finalité de cette action de recherche est tant scientifique qu'opérationnelle. Elle vise à produire un outil d'interprétation des échanges nappes/rivière, assorti de préconisations pour la gestion de la ressource en eau et de la biodiversité selon la politique définie par la transposition de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCEeau, 2006) en droit français et les grands axes du Plan Rhône (DIREN-RA, 2005).

Une des voies envisagées pour identifier et quantifier les échanges nappes/Rhône repose sur une métrique hydraulique mobilisant les méthodes de l'hydrogéologie quantitative. L'objectif de ce travail consiste à mettre en œuvre une méthode simple, peu coûteuse en temps, reproductible, adaptable aux différentes contraintes qu'impose un territoire aussi vaste : le fleuve Rhône du lac Léman à la mer Méditerranée. L'étendue du terrain d'étude impose les contraintes suivantes :

- les données disponibles sont fragmentées et hétérogènes dans le temps et dans l'espace. Bien que nombreuses, elles sont éparées, lacunaires, parfois anciennes, souvent empreintes d'incertitudes, généralement asynchrones, de sources variées et parfois confidentielles ;
- les configurations hydrogéologiques dans lesquelles se déroulent les échanges résultent d'une histoire géologique complexe. Elles sont donc diverses et peuvent mettre en jeu différents types d'aquifères (alluviaux, cristallins fissurés, massifs calcaires karstifiés ou non...) et des contextes variés ;
- les aménagements anthropiques sont nombreux. Qu'il s'agisse de centrales nucléaires, de barrages hydroélectriques, de canaux de dérivation, d'écluses, de contre-canaux, de pompes en nappes pour l'eau potable, l'agriculture ou l'industrie : ces ouvrages influencent les échanges nappes/Rhône.

Face à de telles contraintes et sur un territoire aussi vaste la modélisation globale des échanges nappes/rivière, bien qu'envisageable, reste difficile. L'utilisation de modèles locaux, quant à elle, est coûteuse en temps de travail et n'est possible que si les données existent ou sont disponibles. Nous nous sommes donc orientés vers une méthode permettant de tirer le meilleur parti des données existantes (avant d'en acquérir de nouvelles) et une mise en œuvre moins lourde que les modèles mathématiques, fondée sur les outils SIG d'analyse spatiale.

Cette communication est organisée de la façon suivante. Après avoir présenté les principales particularités du fleuve Rhône et les raisons ayant conduit à la sélection du secteur test, on détaillera ensuite la méthode d'analyse spatiale utilisée et les données minimales requises. La troisième partie exposera les principaux résultats, discutés dans une quatrième partie du point de vue de leur validité.

## 2. Terrain d'étude : du fleuve Rhône à la sélection d'un secteur test

### 2.1. Le Rhône : un fleuve aménagé au cours contrasté

Le fleuve Rhône naît en Suisse dans le massif Saint-Gothard au glacier de la Furka. Il entre en France peu après Genève (lac Léman), environ 300 km après sa source, et parcourt quelques 545 km sur le territoire français jusqu'à la Méditerranée. Approximativement 90% de son bassin versant est situé en France, soit une superficie d'environ 100 000 km<sup>2</sup>. Ce fleuve est associé à des aquifères de types différents : sédimentaires, intensément plissés, alluviaux, de socles, formations peu imperméables localement aquifères...

Sur le Rhône, les premiers travaux d'aménagement datent du 18<sup>e</sup> siècle pour se poursuivre jusqu'à nos jours (digues, épis, dérivations, contre-canaux, barrages...) (Coulet & al., 1987). En France, les principaux aménagements ont été réalisés par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) qui a construit 18 ouvrages en 50 ans (1948 à 1986) pour favoriser le développement de l'hydroélectricité, de la navigation fluviale, et de l'irrigation. Sur le Haut-Rhône, par exemple, le barrage de haute-chute (ou barrage-réservoir) de Génissiat a été construit en 1948 (chute d'eau de 60 à 69 m, capacité de stockage de 53 millions de m<sup>3</sup>). On observe aussi sur le cours du Rhône 16 autres aménagements à dérivation dits « au fil de l'eau », avec des chutes d'eau comprises entre 5,5 m et 20,7 m. Ce type d'ouvrage « au fil de l'eau » est le plus courant, il est constitué de différents éléments :

- un canal de dérivation artificiel où est placée l'usine hydroélectrique avec un canal d'amené et un canal de fuite ;
- le Rhône court-circuité, Vieux-Rhône ou ancien Rhône isolé par un barrage en amont ;
- une zone de retenue en amont du barrage qui est endiguée et bordée de contre-canaux qui reçoivent les eaux de percolation à travers les digues et assurent le drainage et/ou le soutien de la nappe alluviale.

Aujourd'hui le Rhône est un fleuve très anthropisé. Le fleuve naturel du passé caractérisé par ses tressages, ses méandres, ses crues violentes est à présent régulé sur 50% de sa longueur (Fruget, 2003).

### 2.2. Sélection d'un secteur test : l'aménagement de Brégnier-Cordon (Haut-Rhône)

Ce site a été sélectionné à partir de 3 critères principaux :

- il est a priori relativement peu anthropisé même si un ouvrage CNR « au fil de l'eau » y est présent. La compréhension des mécanismes d'échange doit prendre en compte dans la mesure du possible l'influence de cet ouvrage, mais aussi des captages ou de tout autre élément perturbant les écoulements naturels du fleuve ou de la nappe et les milieux dans lesquels ils se font ;
- il existe des données disponibles sur les plans hydrauliques (données CNR et bibliographiques) ;
- il s'agit d'un secteur ou des hypothèses sur les échanges nappes/Rhône ont été pré-identifiées à grande échelle (Schindler, 2006).

Le secteur de Brégnier-Cordon se situe à une centaine de kilomètres en amont de Lyon (Figure 1). Le Rhône y coule entre la chaîne plissée du Jura et son avant pays tabulaire, l'île Crémieu. Son débit moyen sur le secteur est de 423 m<sup>3</sup>/s. Le débit à fréquence quinquennale de basses-eaux est de 160 m<sup>3</sup>/s et le débit de crue cinquantennale de 1900 m<sup>3</sup>/s.

Sur sa rive droite, le Rhône côtoie les calcaires secondaires karstifiés du Jura. Dans la plaine, la puissance des dépôts quaternaires est comprise entre 40 et 60 m. Le secteur de Brégnier-Cordon est géologiquement caractérisé par un encaissant de terrains secondaires à dominante calcaire et marno-calcaire (réservoirs aquifères karstiques), et par des alluvions quaternaires de faible superficie dans les vallées avec des apports significatifs des massifs et des plaines alluviales (Chauve, 2006). Dans ce type de formations, les perméabilités sont de l'ordre de 10<sup>-3</sup> à 10<sup>-5</sup> m/s.

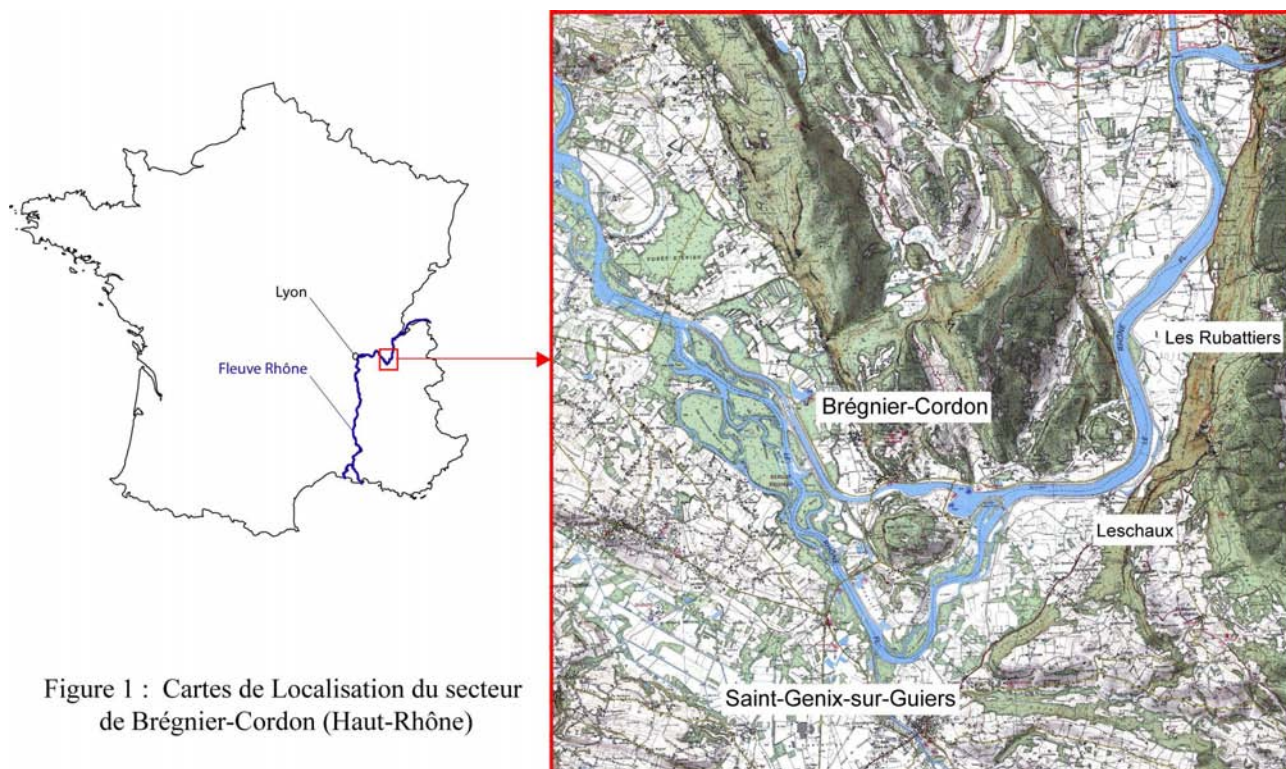


Figure 1 : Cartes de Localisation du secteur de Brégnier-Cordon (Haut-Rhône)

La pente du Rhône qui est proche de 0,5‰ en amont, entre Chautagne et Guiers, se raidit à 1‰ dans la plaine de Brégnier-Cordon. Cette forte pente, l'une des plus vigoureuses du Haut-Rhône, associée à une abondante charge de granulométrie grossière apportée par les affluents préalpains, a favorisé le développement d'un style géomorphologique de tressage, où se rencontrent des chenaux instables et peu profonds. A Brégnier-Cordon, le Rhône bénéficie d'un régime pluvio-nival sous le contrôle des affluents alpins (Arve) et subalpins (Usses, Fier et Guiers). Ce régime climatique est aussi qualifié de nivo-glaciaire (Dufour, 2005).

Au contact du Rhône, l'aquifère alluvial est constitué de dépôts fluviatiles sablo-graveleux sur une dizaine de mètres d'épaisseur. D'une manière générale, la nappe alluviale est alimentée en période de hautes-eaux par le fleuve. Lors des étiages, elle est au contraire drainée. La plus forte zone de contact entre les eaux du fleuve et les eaux souterraines s'établit au niveau de la confluence avec le Guiers.

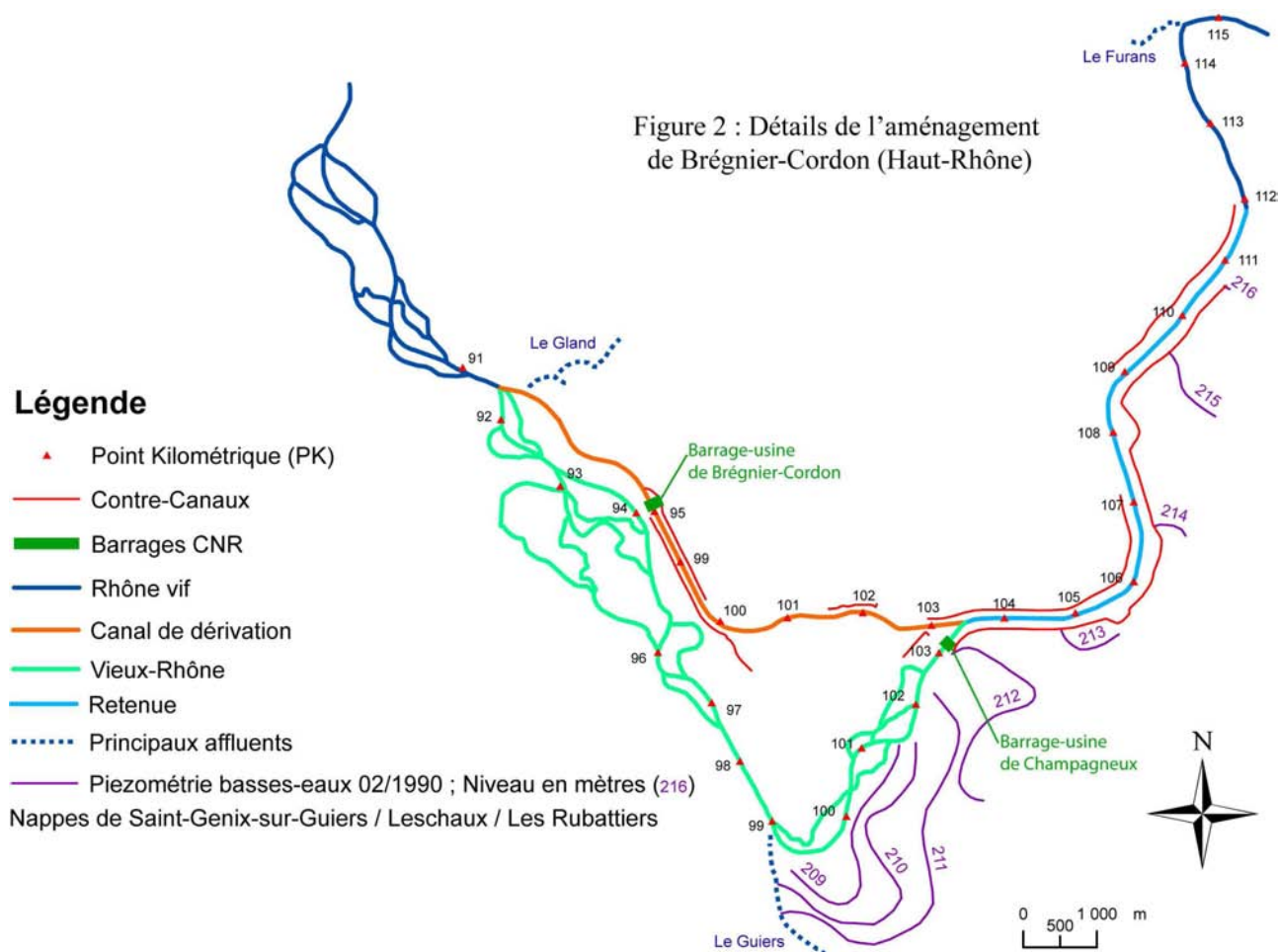
Pour finir, l'aménagement CNR actuel a été mis en service en 1984 (Coulet & al., 1997). Celui-ci est organisé comme tous les ouvrages au « fil de l'eau » (Figure 2). Il est prévu pour turbiner au maximum 780 m<sup>3</sup>/s. Les débits réservés sur le Vieux-Rhône représentant 1/6<sup>e</sup> du module depuis 2004, avec un débit plancher de 65 m<sup>3</sup>/s. Ils doivent permettre de limiter les facteurs d'altération, tel l'arrêt du transport solide sur le Rhône court-circuité qui provoque entre autres une accentuation de l'érosion des berges, un abaissement des nappes phréatiques, un ralentissement des écoulements souterrains et superficiels et des problèmes d'eutrophisation. L'aménagement de Brégnier-Cordon concerne 28 km de Rhône entre La Balme (Savoie) et Evieu (Ain) avec une retenue de 12 km, un canal d'amenée de 5 km (dans la dépression de l'ancien lac de Pluvis), un canal de fuite de 3 km débouchant à Evieu, une hauteur de chute maximale de 14,3m et une production annuelle de 360 millions de kW/h (Rampnoux, 1992).

### 3. Données hydrogéologiques et spatialisation des échanges nappes/rivière

Le Rhône est en relation avec des aquifères alluviaux sur environ 75% de son cours, rive droite et gauche confondues. Les échanges eaux souterraines/eaux de surface étant au cœur du projet, la méthode mise au point doit être à même de les évaluer de manière suffisamment rigoureuse et détaillée, et doit être reproductible sur les deux rives du fleuve et sur tout l'allongement de son cours en France. Les données sur les aquifères sont souvent à assez grande échelle (1/10 000<sup>e</sup>) ; il faut en faire une synthèse précise pour pouvoir les intégrer dans le projet global.



Figure 2 : Détails de l'aménagement de Brégnier-Cordon (Haut-Rhône)



Pour chaque aquifère recensé, cette méthode doit permettre de déterminer le sens de l'échange en chaque point, d'évaluer la quantité échangée d'une manière rigoureuse et de faire un bilan relatif sur toute la longueur de l'interface nappes/rivière. Pour un aquifère alluvial donné, donc sur une extension de quelques kilomètres, on prendra en compte trois ensembles : l'aquifère alluvial, le cours d'eau et leur interface que l'on considèrera être la rive du cours d'eau. Par convention on exprimera en valeurs positives les quantités échangées dans le sens nappe vers rivière et négativement celles en sens inverse.

### 3.1. L'aquifère : calcul du flux et évaluation des débits

Pour les aquifères alluviaux importants on dispose en général de données détaillées sous forme de cartes piézométriques, souvent en basses-eaux, moyennes-eaux, hautes-eaux. On s'intéressera en priorité aux situations de basses-eaux, qui correspondent aux épisodes du système présentant les enjeux à optimiser. En milieu poreux, cas des aquifères alluviaux, l'écoulement de l'eau est exprimé par la Loi de Darcy (De Marsily, 1981) :  $q = K.A.i$ .

$q$  : Débit en  $m^3/s$ ,

$K$  : Coefficient de perméabilité de l'aquifère en  $m/s$ ,

$A$  : Section d'écoulement en  $m^2$ ,

$i = \frac{dH}{dL}$  : Gradient hydraulique.

Partant d'une carte piézométrique digitalisée, un TIN (Triangulated Irregular Network) permet de restituer le modelé 3D de la surface de la nappe, « slope » en donne la pente (en %), c'est-à-dire le gradient ( $i = dH/dL$ ) en tout point, et « aspect » la direction de l'écoulement. La rive du cours d'eau constitue une limite de la nappe. Pour le paramètre  $A$ , par convention, faute d'avoir des données plus précises, on

prendra une section d'échange  $A$  (données bathymétriques) égale à  $4 \text{ m}^2$  par mètre linéaire au droit de la rive. Si, ultérieurement, on dispose d'une méthode rigoureuse pour évaluer la grandeur  $A$ , il suffira d'appliquer le coefficient multiplicateur ad-hoc pour ajuster les valeurs du débit d'échange.

Si l'on transforme le TIN « slope nappe » en un GRID « slope nappe » (appellations choisies pour éviter des confusions), et si l'on a une carte des perméabilités ( $K$ ), il est aisé d'évaluer le débit de l'aquifère dans chaque maille. Le débit global peut être calculé si l'on dispose de la topographie détaillée du substratum, ce qui est toutefois assez rarement le cas, mais permet d'évaluer la hauteur mouillée (ce qui est différent de la surface d'échange nappes/rivière jamais précisément connue, et fixée par hypothèse à  $4 \text{ m}^2$ ).

Le TIN « aspect nappe » transformé en GRID donne les directions d'écoulement de la nappe en tout point. Ce qui nous intéresse ici ce sont les débits et leurs directions sur les mailles limites correspondant à l'interface avec le cours d'eau. Si le flux est perpendiculaire à l'interface le débit entrant ou sortant est totalement échangé. Si le flux de la nappe est parallèle au cours d'eau, l'échange est nul. En situation intermédiaire, un simple calcul angulaire (par son cosinus) permet d'établir le pourcentage d'échange.

### 3.2. La rive, son orientation par analyse spatiale et le calcul d'échanges

Du cours d'eau, on ne prendra en compte que la rive droite ou gauche, qui constitue la limite de la surface piézométrique de la nappe. Pour les nappes alluviales importantes qui accompagnent le Rhône, l'interface avec le cours d'eau s'étend donc en général sur plusieurs kilomètres, et elle est souvent assez sinueuse. Cette sinuosité d'une part et la piézométrie de la nappe d'autre part ne permettent pas d'évaluer les échanges ni localement ni de manière globale de manière simple.

Il est plus facile de discrétiser la polyligne représentant la rive en segments unitaires (entre vertex), puis de faire l'évaluation des échanges sur chaque segment unitaire (de l'ordre de 100 à 200 m de longueur). La pente du lit du fleuve n'est pas utilisée à ce stade du travail. Pour cela il faut évaluer l'orientation de chaque segment, la comparer avec l'orientation du flux de la nappe, et calculer le coefficient angulaire, puis le débit d'échange.

Pour calculer l'orientation des segments on construit un tampon (buffer) de 100 m sur les polygones des rives et du côté de la nappe ; une valeur quelconque (100 par exemple) a été affectée à la ligne limite extérieure du tampon, les rives proprement dites restant à 0. Le TIN circonscrit au fleuve et à la zone tampon donne pour chaque triangle une valeur « aspect », « nodata » pour le cours d'eau qui correspond à la perpendiculaire au vecteur de rive local ; la pente est de 100% ( $45^\circ$ ), dans tout le buffer (Figure 3). L'orientation de chaque vecteur unitaire de rive est calculée par simple soustraction de  $90^\circ$  à l'angle d'orientation. La transformation en GRID du TIN « aspect rive », permet le calcul immédiat des angles d'échange. Le GRID « angle d'échange » est obtenu par simple soustraction des deux GRIDs : GRID « aspect rive » - GRID « aspect nappe » qui contient le sens d'écoulement de la nappe élaboré en 3.1. L'orientation du vecteur unitaire de rive est à  $90^\circ$  de la valeur donnée par le GRID « aspect rive » ; si nécessaire le calcul peut être aisément effectué et attribué comme attribut à chaque vecteur.

Le GRID (cosinus (Angle d'échange)) dont les valeurs vont de 1 (100%) à -1 (-100%) est le coefficient d'échange pour chaque vecteur unitaire de rive. Multiplié par le débit de nappe calculé en chaque point il donne le débit d'échange entre la nappe et le fleuve, pour chaque segment. Une sommation doit être faite sur toute la polyligne figurant la rive pour effectuer le bilan global pour la totalité de l'aquifère.

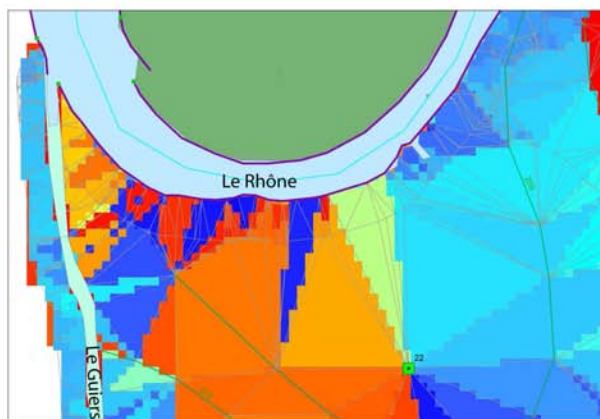
## 4. Résultats : spatialisation des échanges nappes alluviales/Rhône

La figure 4 donne une représentation des angles d'échange entre la nappe et le Rhône (ou localement le contre-canal qui longe le Rhône lorsque celui-ci est endigué). La figure 5 donne les débits calculés par cette méthode pour les échanges entre la nappe et le Rhône.

### 4.1. Représentation de l'angle et du sens de l'échange nappes/Rhône

Sur la figure 4, on observe en jaune les secteurs où l'écoulement de la nappe et du Rhône sont quasiment parallèles (de  $20^\circ$  à  $-20^\circ$ ) et donc les échanges faibles à nuls ; en vert les secteurs où le Rhône draine la nappe (en vert foncé les secteurs où le drainage est potentiellement le plus fort pour des angles de  $80^\circ$  à

100°) ; en rouge les secteurs où le Rhône alimente la nappe (en rouge foncé les secteurs où l'alimentation est potentiellement la plus forte pour des angles de -80° à -100°).



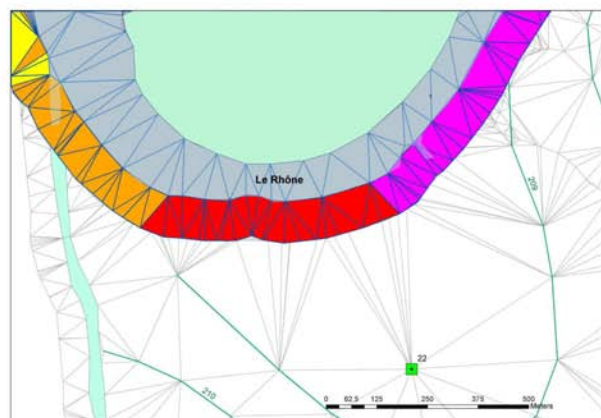
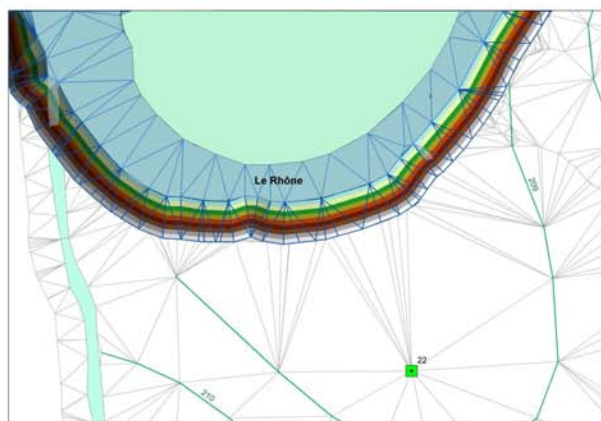
Les trois dessins représentent la nappe bordant le Rhône en rive gauche au sud de l'aménagement de Brégnier-Cordon, juste avant la confluence du Guiers.

Ci-dessus : le tin "aspect" donne la direction d'écoulement de la nappe ; les zones bleu foncé et rouges marquent un écoulement vers le nord (345° à 15°). Les zones oranges vers le nord-est, les bleu-clair à cyan vers le nord-ouest. Noter, en bas à droite, l'écoulement radial en direction du pompage (point carré vert) qui correspond au cône de rabattement.

En haut à droite : le tin "elevation" associé à la zone tampon de 100 m à partir de la rive gauche du Rhône. L'élévation a pour seul intérêt que de bien montrer l'orientation de la "pseudo-pente", perpendiculaire la rive.

En bas à droite : le tin "aspect" du buffer ci-dessus montre bien les orientations des tronçons de rives et leurs normales : en rouge normale vers le nord (rive orientée est-ouest), en orange normale vers le nord-est (rive orientée NO ou NNO), en violet normale orientée nord-ouest (rive vers le SO ou SSO).

Figure 3 : Illustration de la méthode d'analyse spatiale : directions d'écoulement de la nappe, buffer, orientations des tronçons de rives



#### 4.2. Représentation du débit d'échange nappes/Rhône

La figure 5 représente les débits échangés pondérés à l'interface nappe/Rhône calculés à l'aide des gradients contenus dans le TIN de l'aquifère en utilisant la Loi de Darcy. Ils sont ici exprimés en  $\text{m}^3$  par jour pour une section utile fixée par hypothèse à  $4\text{m}^2$  et pour 3 gammes de valeurs de perméabilités :  $8,5 \cdot 10^{-3}$  (PK 102,5 à 99),  $5,10^{-3}$  (PK 111 à 106) et  $4,10^{-4}\text{m/s}$  (PK106 à 102,5) selon la zone d'alluvions où est située la berge (Rampoux, 1992 ; Michal, 1988).

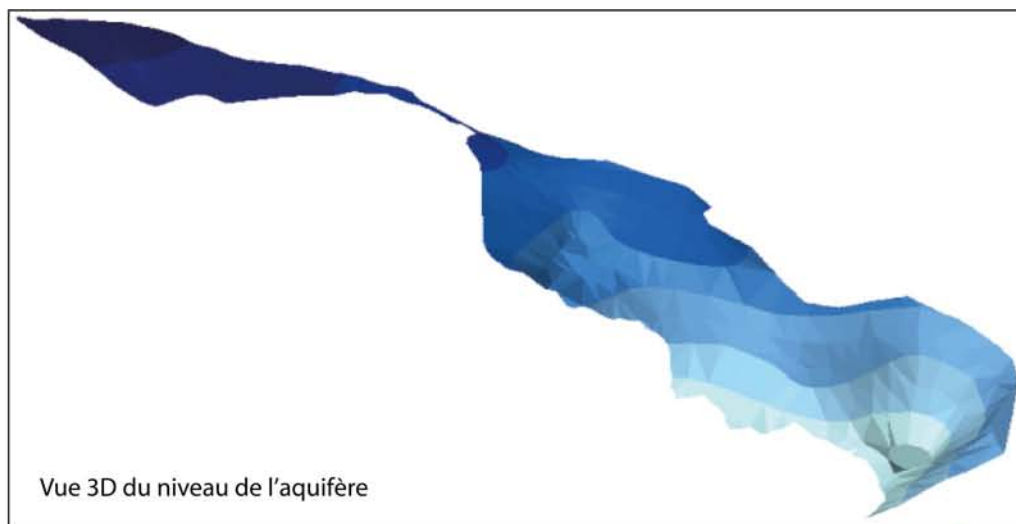
Sur la figure 5 le signe moins (-) indique une alimentation de la nappe par le fleuve et le signe plus (+) un drainage de la nappe par le fleuve. L'intensité du débit dans le cas d'une alimentation est représentée de façon croissante du orange au rouge ; dans le cas d'un drainage selon un dégradé du vert clair au vert foncé. La couleur bleu indique de très faibles débits échangés.

Après calcul de la longueur de chaque segment de berge, il est simple de réaliser un bilan des quantités d'eau échangées par les nappes et le fleuve Rhône à l'aide du SIG. Sur le secteur étudié, la longueur de berge analysée (rive gauche) est d'environ 12 400 m. On observe à partir des résultats de l'analyse spatiale exprimés en  $\text{m}^3/\text{jour}$  que :

- sur environ 4 070 m le fleuve alimente la nappe à raison de  $945 \text{ m}^3/\text{jour}$  ( $\sim 0,011 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ce qui correspond à un apport total de  $232 \text{ m}^3/\text{jour/km}$  ( $\sim 0,003 \text{ m}^3/\text{s/km}$ ) ;

- sur environ 8 340 m le fleuve draine la nappe à raison de  **$47\,160 \text{ m}^3/\text{jour}$**  ( $\sim 0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ce qui correspond à un apport total de  **$5\,655 \text{ m}^3/\text{jour/km}$**  ( $\sim 0,065 \text{ m}^3/\text{s/km}$ ).

Ces résultats montrent des relations d'échanges nappes/Rhône relativement faibles sur la portion de berge étudiée.



### Légende

Angle d'échange nappes/Rhône  
Angle en degrés  
(- : Rhône vers nappe ; + : nappe vers Rhône)

- 155 / -135
- 135 / -100
- 100 / -80
- 80 / -45
- 45 / -20
- 20 / +20
- +20 / +45
- +45 / +80
- +80 / +100
- +100 / +130

Niveaux piézométriques  
Altitude en mètres

- 215 - 216
- 214 - 215
- 213 - 214
- 212 - 213
- 211 - 212
- 210 - 211
- 209 - 210
- 208 - 209

Fleuve Rhône

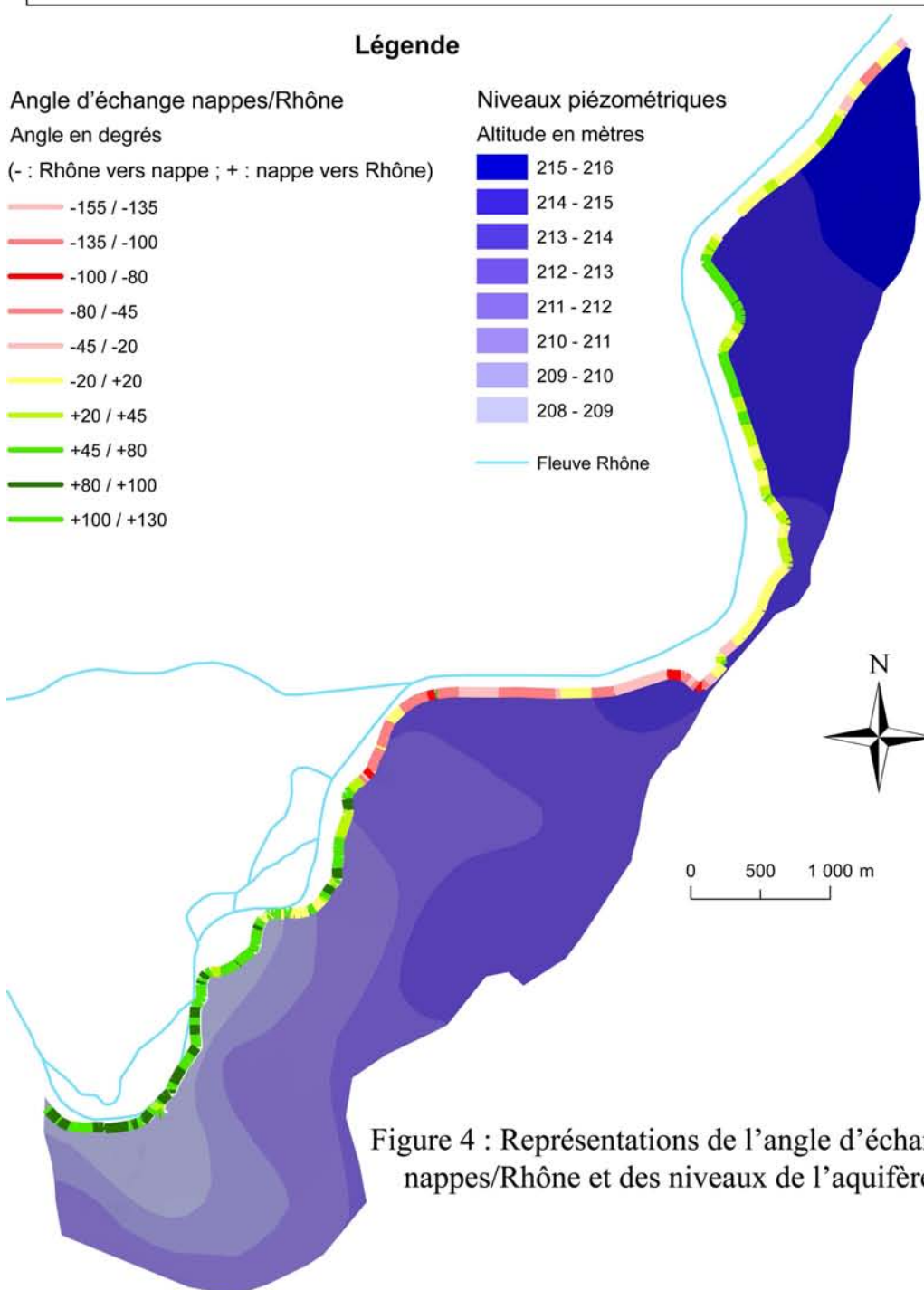


Figure 4 : Représentations de l'angle d'échange nappes/Rhône et des niveaux de l'aquifère



## Légende

Débits d'échange nappes/Rhône (q) en m<sup>3</sup>/jour

- : Rhône vers nappe / + : nappe vers Rhône

— -3,6 / -1,5

— -1,5 / -0,001

— -0,001 < q < +0,001

— +0,001 / +6

— +6 / +15

— +15 / +27

— +27 / +44

--- Piézométrie basses-eaux 02/1990

--- Piézométrie complémentaire

--- Limites de l'aquifère

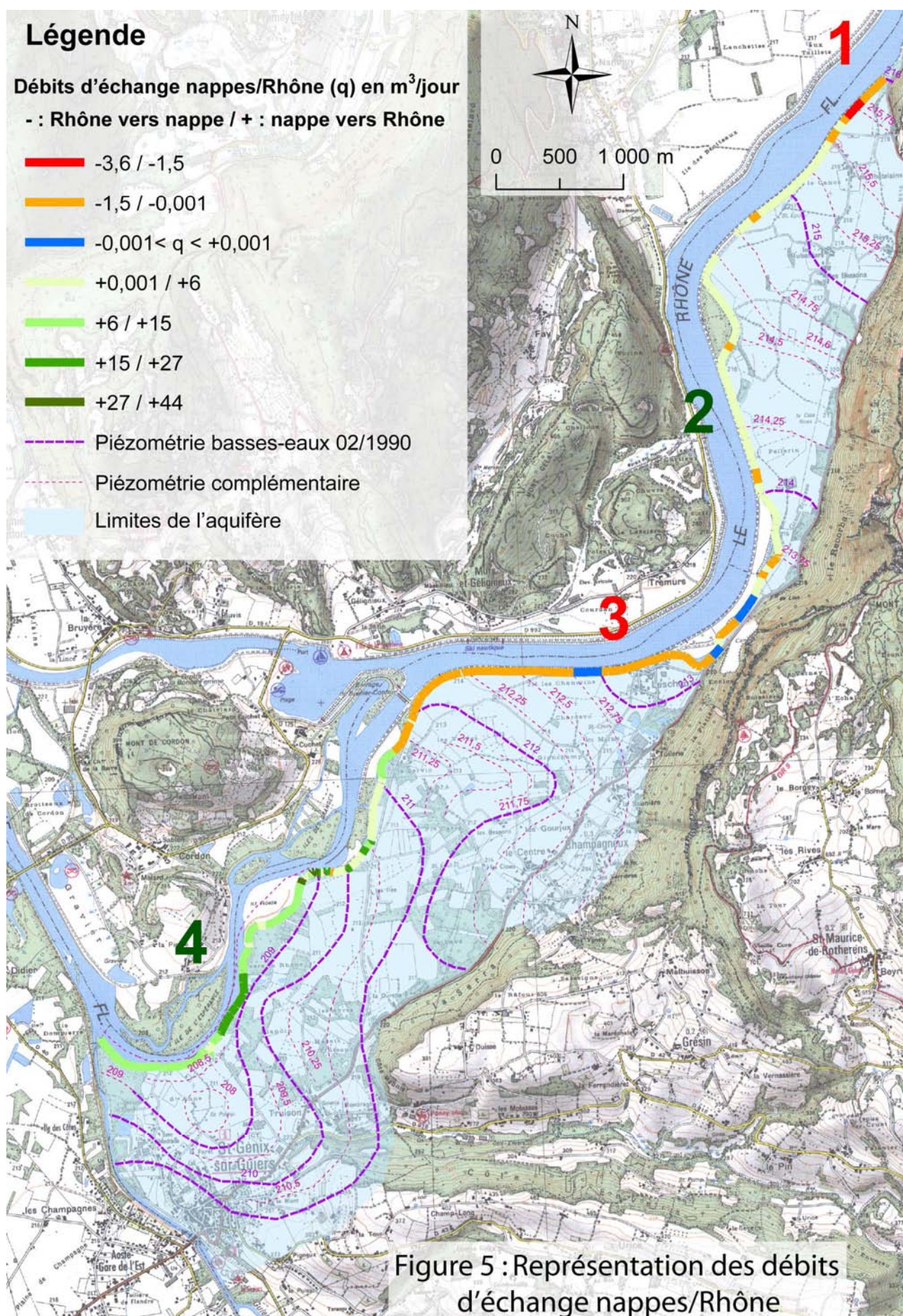


Figure 5 : Représentation des débits d'échange nappes/Rhône



## 5. Discussion : validité des résultats

Il convient de s'assurer de la validité des résultats obtenus par analyse spatiale et de vérifier leur conformité sur le plan qualitatif et quantitatif. Pour cela, nous mettrons à contribution des études hydrogéologiques antérieures réalisées sur le secteur de Brégnier-Cordon, et des calculs de débits d'échanges réalisés manuellement à partir des mêmes données.

Sur le plan qualitatif, l'interprétation des échanges nappes/Rhône réalisée sur ce secteur par Michal (1988) et Rampnoux (1992) pour une piézométrie basses-eaux est la suivante (les chiffres en couleurs renvoient à la figure 5) :

- **1** : le Rhône alimente la nappe au Nord du secteur des Rubattiers ;
- **2** : le Rhône draine la nappe au Sud du secteur des Rubattiers ;
- **3** : le Rhône alimente la nappe entre Leschaux et le canal de dérivation au Nord du secteur de Saint-Genix-sur-Guiers ;
- **4** : le Rhône draine la nappe au Sud du secteur de Saint-Genix-sur-Guiers.

Nos résultats sont conformes, sur le plan qualitatif, avec cette interprétation. Leur précision est supérieure aux hypothèses de Schindler (2006) qui ne considéraient que la tendance générale de drainage de la nappe par le Rhône sur cette zone.

Sur le plan quantitatif, le calcul manuel des débits d'échanges nappes/Rhône sur 11 points représentatifs à partir des mêmes données d'entrées a été effectué. Puis, un test de corrélation a été réalisé entre les valeurs obtenues manuellement et celles obtenues par analyse spatiale. La corrélation entre les deux séries de valeurs est significative ( $r=0,79$ ,  $n=11$ ,  $p<0,05$ ). On peut donc conclure que l'on obtient des résultats similaires avec les deux méthodes.

## 6. Conclusion : validation, perspectives et transposabilité de la méthode

### 6.1. Validation complémentaire des résultats

A l'avenir, il conviendra de confronter les résultats de cette méthode à ceux obtenus grâce à des modèles mathématiques d'écoulement souterrain, sur des secteurs où ceux-ci préexistent, pour estimer la robustesse de notre approche. Ce travail sera réalisé sur les secteurs de Chautagne-Lavours et de Péage-de-Roussillon déjà modélisés par le bureau d'étude BURGEAP.

De plus, l'action de recherche ZABR/AE-RMC qui vise à identifier et à quantifier les échanges nappes/Rhône du Léman à la Camargue, en tenant compte des aménagements, est initialement fondée sur une méthodologie interdisciplinaire. Ainsi, les premiers résultats de la métrique hydraulique (hydrogéologie quantitative) sont actuellement confrontés à ceux de métriques hydrobiologiques (indicateurs biologiques : macrophytes<sup>1</sup>, invertébrés souterrains<sup>2</sup>) et géochimiques<sup>3</sup> (traceurs chimiques et isotopiques) permettant elles-aussi de caractériser les échanges nappes/rivière (Graillot & al., 2008).

### 6.2. Perspectives et transposabilité de la méthode

Cette méthode est encore perfectible. Il est en effet possible d'améliorer les calculs et de les automatiser. Ainsi, il conviendra :

- d'affiner la génération des TIN pour supprimer les segments correspondants aux tronçons de berges sans valeur de débit ;
- de généraliser l'utilisation de la méthode quelque soit la berge du fleuve étudiée et l'orientation de l'écoulement du fleuve ;

<sup>1</sup> Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire « Écologie des Hydrosystèmes Fluviaux » UMR CNRS 5023 (EHF), Équipe « Écologie des Communautés Végétales »

<sup>2</sup> Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire « Écologie des Hydrosystèmes Fluviaux » UMR CNRS 5023 (EHF), Équipe « Hydrobiologie et Écologie Souterraines »

<sup>3</sup> Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, UFR Sciences Exactes et Sciences de la Nature, Département Géologie, Laboratoire d'Hydrogéologie (EA 2665)

- d'automatiser l'enchaînement des fonctions d'analyse spatiale pour un traitement plus rapide ;

L'automatisation des calculs pourra être effectuée à l'aide du module de construction de modèles dynamiques proposé par ARCGIS (version 9.2.). Ceci permettra de transposer la méthode non seulement sur d'autres secteurs (aménagements CNR) mais aussi sur d'autres cours d'eau, pour des aquifères alluviaux en changeant simplement les données d'entrée sous réserve qu'elles existent.

### 6.3. Bilan

La méthode présentée dans cette communication n'est utilisable que dans un contexte hydrogéologique où la Loi de Darcy est applicable, c'est-à-dire dans des formations poreuses. Il conviendra donc d'élaborer d'autres méthodes d'analyses pour les différents contextes hydrogéologiques rencontrés tout au long du fleuve Rhône (ex : aquifères de socles, aquifères karstiques...). Bien que reposant sur un jeu de données minimal, la précision des résultats est conditionnée par :

- la connaissance des impacts anthropiques sur les différents objets hydrologiques (ex : pompages, barrages...) ;
- l'existence et la qualité des données de départ. A l'heure actuelle, il n'y a pas à notre connaissance de cartes piézométriques après aménagement CNR pour tous les aquifères alluviaux du Rhône. De plus, l'absence de profil en long conduit à travailler sur des hypothèses concernant la surface d'échange utile. Il existe cependant plusieurs secteurs qui ont fait l'objet d'une modélisation hydrologique avec calage des coefficients d'échange entre la nappe et le Rhône. Ces modèles peuvent, dans certaines conditions, servir aux tests de référence pour l'ajustement de la méthode proposée ici.

Malgré les limites exposées ci-avant, cette méthode présente les avantages suivants :

- elle limite l'effet observateur (utilisateur) potentiellement existant lors de calculs manuels ;
- elle peut être systématisée et automatisée ;
- elle est reproductible secteur après secteur sous réserve d'obtention des données nécessaires ;
- elle est souple d'utilisation car des données acquises ultérieurement peuvent être intégrées dans la base de données pour le calcul des débits (ex : champ de perméabilité, surface d'échange utile). Elle permet aussi un travail actualisé à partir d'hypothèses sur les données quand celles-ci sont manquantes ;
- elle permet, si les données existent, une représentation linéaire des échanges sur l'ensemble des berges comparable de la réalité de terrain ;
- elle permet de réaliser des bilans à différentes échelles par agrégation des valeurs de débits sur les segments de berge. Ceci sera très pratique pour travailler à des échelles compatibles avec les résultats obtenus dans les métriques biologiques et géochimiques par exemple.

### 7. Références bibliographiques

Bornette G., Dechomets R., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Graillot D., Jezequel C., Lafont M., Marmonnier P., Paran F., Piscart C., Puijalon S. & Simon L. (2008) – Évaluation des échanges nappes rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapport intermédiaire, Action recherche valorisation ZABR – Phase 2, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE), Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), Cemagref (Lyon) 129p. + Annexes.

Bornette G., Dechomets R., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Graillot D., Lafont M., Paran F. & Puijalon S. (2007) – Évaluation des échanges nappes rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapport intermédiaire, Action recherche valorisation ZABR n°A11 – Phase 1, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE), Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), Cemagref (Lyon) 167p. + Annexes.

Chauve P. (2006) – Jura. In. Aquifères et eaux souterraines. 2 tomes, Collection scientifique et technique BRGM ed, Tome 2, pp.561-590.

Coulet M., Vebard B. & Monnet P. (1997) – Impacts des aménagements hydroélectriques sur l'écosystème Rhône. FRAPNA Lyon, 181p.

DCEeau (2006) – Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

En ligne : [http://europa.eu.int/eur-lex/pri/fr/oj/dat/2000/l\\_327/l\\_32720001222fr00010072.pdf](http://europa.eu.int/eur-lex/pri/fr/oj/dat/2000/l_327/l_32720001222fr00010072.pdf)

De Marsily G. (1981) – Hydrogéologie quantitative. Collection des sciences de la terre, Masson ed.

DIREN-RA (2008) – Plan Rhône : Un projet de développement durable. Projet Plan Rhône, Version provisoire du 1 décembre 2005, 130p.

Dufour S. (2005) – Contrôles naturels et anthropiques de la structure de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme, Rhône). Mémoire de thèse de doctorat, Université Jean Moulin, Lyon 3, 244p.

Fruget J.P. (2003) – Changements environnementaux, dérives écologiques et perspectives de restauration du Rhône Français : bilan de 200 ans d'influences anthropiques. VertogO La revue en sciences de l'environnement, Vol 4, N° 3, dec 2003, 17p.

Graillot D., Paron F., Mimoun D., Bornette G., Gibert J. & Cadilhac L. (2008) Coupling groundwater modeling with biology to identify strategic water resources. In. Proceedings of the conference "ModFlow and More : Ground Water and Public Policy", organisée par Colorado School of Mines, Golden, USA, May 2008, pp209-213.

Michal P. (1988) – Modes d'alimentation d'une nappe alluviale : nappe de la vallée du Rhône entre La Balme et Saint-Genix-sur-Guiers (Savoie). Thèse de docteur de 3<sup>e</sup> cycle, option hydrogéologie, Université scientifique, technologique et médicale de Grenoble.

Rampnoux J.P. (1992) – Aquifères n°12, 12bis, 12ter et 13, Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la vallée du Rhône et de la basse vallée du Guiers en rive savoyarde, Synthèse des données générales existantes sur la nappe alluviale. CG Savoie, DDAF Savoie, 34p. + annexe.

Schindler A. (2006) – Etude des relations nappe-rivière, Bassin Rhône- Méditerranée. Rapport de licence, Agence de l'eau RMC, Université Lyon 1, 70p.